

SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

BRAGANÇA, Luís¹; MATEUS, Ricardo²;

Palavras-chave: Sustentabilidade, metodologias de avaliação, soluções construtivas

1. Introdução

Uma construção só pode ser considerada sustentável quando as diversas dimensões do desenvolvimento sustentável – ambiental, económica, social e cultural – são ponderadas durante a fase de projecto. Para além de se considerarem parâmetros ao nível da escala do edifício, também se podem considerar parâmetros que avaliem a interacção do edifício com o meio em que este está implantado. Normalmente, os parâmetros que servem de apoio à avaliação da sustentabilidade estão relacionados de uma forma ou doutra com os seguintes objectivos: redução da utilização de energia e materiais não renováveis; redução do consumo de água; redução da produção de emissões, resíduos e outros poluentes. Nas diferentes metodologias de avaliação da sustentabilidade, normalmente é possível identificar os seguintes objectivos: optimização do potencial do local, preservação da identidade regional e cultural, minimização do consumo de energia, protecção e conservação dos recursos de água, utilização de materiais e produtos de baixo impacte ambiental, adequada qualidade do ambiente interior e optimização das fases de operação e manutenção.

O objectivo da avaliação da sustentabilidade é reunir dados e reportar informação que servirão de base aos processos de decisão que decorrem durante as diversas fases do ciclo de vida de um edifício. A pontuação sustentável e o perfil sustentável de um edifício resultam dum processo no qual os factores mais importantes são identificados, analisados e avaliados. Actualmente, podem ser identificadas duas tendências antagónicas no contexto das ferramentas de avaliação: de um lado a complexidade e a diversidade de indicadores desenvolvidos por diferentes entidades e do outro, a evolução no sentido da sua efectiva implementação, através do desenvolvimento de indicadores comuns e simplificação do processo de avaliação.

O desenvolvimento de métodos de avaliação da sustentabilidade e respectivas ferramentas é um desafio não só para as academias, como também para a indústria. Actualmente, existe uma variedade de ferramentas no mercado da construção que têm sido utilizadas na avaliação da construção sustentável e/ou no apoio à concepção sustentável. As ferramentas mais conhecidas são a BREEAM, desenvolvida no Reino Unido e a LEED, desenvolvida nos Estados Unidos (Edwards & Bennett 2003). Existem também ferramentas baseadas nos sistemas Análise de Ciclo de Vida (ACV) que foram especialmente desenvolvidas de modo a abranger os edifícios no seu todo. A maioria das ferramentas está desenvolvida numa abordagem *bottom top*, isto é, a soma e combinação do desempenho dos diversos materiais e componentes do edifício resultam em grande parte no desempenho global do mesmo, apesar de se considerar o edifício no seu todo, incluindo as

¹ Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

² Assistente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

necessidades energéticas (Erlandsson & Borg 2003). Também se encontram disponíveis algumas ferramentas que servem de suporte aos processos de decisão nas fases de ante-projecto, de modo a que os projectistas recebam os dados necessários para que concebam edifícios de elevado desempenho.

As ferramentas estão a sofrer uma constante evolução para que sejam corrigidas as suas diversas limitações. Actualmente, o principal objectivo é desenvolver e implementar uma metodologia consensual que sirva de suporte à concepção de edifícios sustentáveis, que seja ao mesmo tempo prática, transparente e suficientemente flexível, para que possa ser facilmente adaptada aos diferentes tipos de edifícios e à constante evolução tecnológica que se verifica no domínio da construção. Existem inúmeros países que têm ou que se encontram a desenvolver sistemas próprios de avaliação da sustentabilidade, pelo que as trocas de conhecimento e a coordenação internacional se encontram a crescer exponencialmente.

Com esta comunicação pretende-se apresentar as diferentes abordagens que existem no contexto da avaliação da sustentabilidade da construção e uma metodologia que foi desenvolvida pelo Laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho para a avaliação de soluções construtivas de edifícios. A metodologia aqui apresentada constitui o primeiro passo para o desenvolvimento de uma ferramenta para a avaliação da sustentabilidade global de edifícios de habitação, adaptada à realidade Portuguesa. No final, a metodologia é aplicada a um caso de estudo, que tem como objectivo avaliar comparativamente a sustentabilidade de algumas soluções construtivas convencionais e convencionais para pavimentos e paredes exteriores.

2. Metodologias de apoio, avaliação e reconhecimento da construção sustentável

A construção sustentável tem por base uma série de indicadores e parâmetros que se enquadram nas diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável. A utilização de metodologias que avaliassem a sustentabilidade dos edifícios através da análise de todos esses parâmetros constituiria um processo moroso que desencorajaria a utilização dessas metodologias, o que colocaria em causa a prossecução dos seus objectivos. Deste modo, as metodologias existentes abordam a sustentabilidade de uma forma holística, baseando a avaliação nos indicadores e parâmetros que são considerados mais representativos nos objectivos da avaliação. Um indicador permite avaliar o comportamento de uma solução face a um ou mais objectivos do desenvolvimento sustentável e um parâmetro é uma propriedade mensurável ou observável que fornece informação acerca de um fenómeno, ambiente ou área.

Na avaliação da sustentabilidade da construção existem algumas dificuldades que estão relacionadas com as características particulares desta indústria, salientando-se sobretudo os seguintes aspectos: multidisciplinaridade; processo de produção e produto final são sempre diferentes; durabilidade muito variável; o desempenho dos seus produtos é muito dependente dos seus utilizadores, etc.

Adicionalmente existem outros factores que contribuem para que o processo de avaliação seja complexo, destacando-se a variabilidade do peso de cada indicador e parâmetro na avaliação da sustentabilidade, que depende do contexto político, tecnológico, cultural, social e económico de cada país ou de cada região. Por outro lado, a avaliação envolve diferentes tipos de parâmetros, uns quantitativos e outros qualitativos, que nem sempre estão correlacionados entre si e que não se expressam na mesma grandeza (p.e. estética vs isolamento sonoro a sons de condução aérea).

Em resultado das dificuldades supracitadas, não existe actualmente uma metodologia que seja internacionalmente aceite. Devido a importância do sector dos edifícios, é neste sector que tem incidido a maior parte da investigação que se têm realizado neste domínio. Os diferentes métodos de avaliação da sustentabilidade de edifícios encontram-se orientados para diferentes escalas de análise: material de construção, produto de construção, elemento de construção, zona independente, edifício e local de implantação. Analisando o objectivo das diferentes metodologias e ferramentas existentes é possível distinguir três diferentes tipos:

- Ferramentas de suporte à concepção de edifícios sustentáveis (Performance Based Design);
- Sistemas de análise do ciclo de vida (LCA) dos produtos e materiais de construção;
- Sistemas e ferramentas de avaliação e reconhecimento da construção sustentável.

As ferramentas de suporte à concepção de edifícios sustentáveis são aplicadas às fases de anteprojecto e projecto dos edifícios, apoiando os diversos decisores na definição do desempenho pretendido para o edifício. Desta forma os decisores, nomeadamente o dono-de-obra, descrevem as propriedades pretendidas para a solução final de projecto através de uma hierarquia de requisitos e níveis de desempenho preestabelecidos que, a serem respeitados pela equipa de projecto, se traduzem no desenvolvimento de um edifício mais sustentável (fig. 1). A ferramenta EcoProp desenvolvida na Finlândia é um exemplo de uma destas ferramentas.

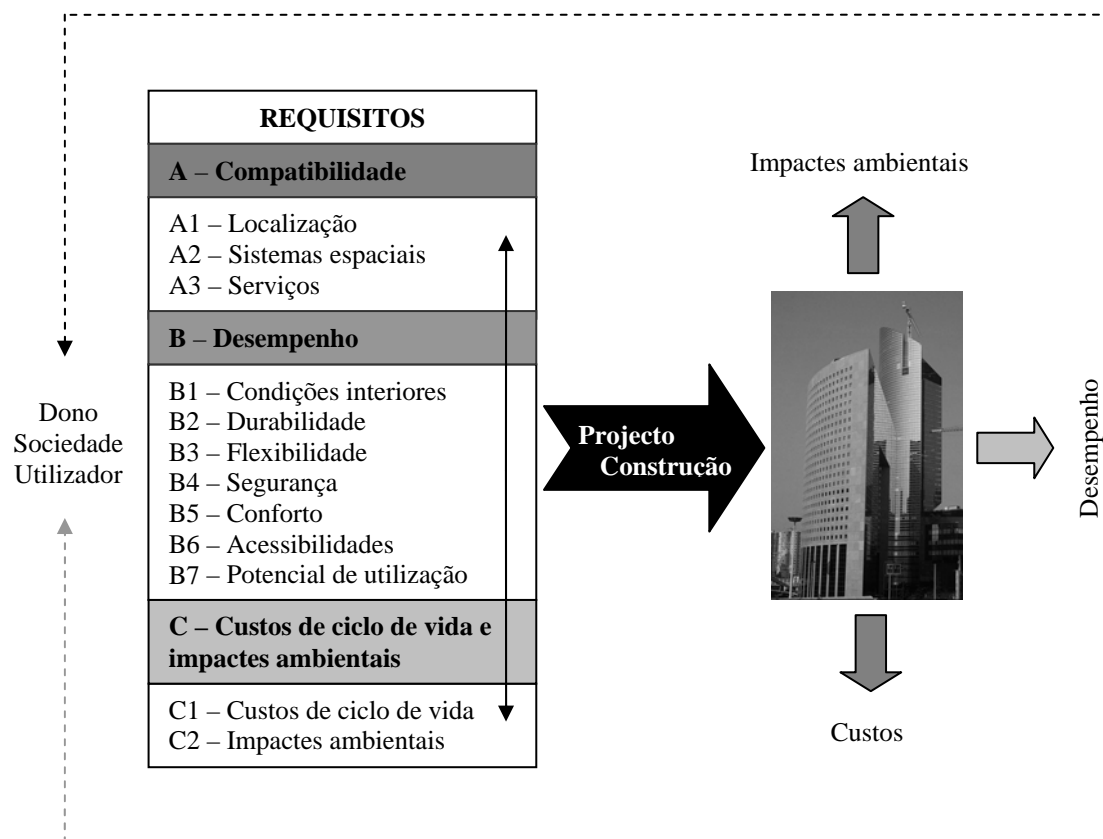


Figura 1 – Modelo genérico de uma ferramenta de suporte à concepção de edifícios sustentáveis

Os sistemas de análise do ciclo de vida (LCA) aplicam-se às fases de projecto e anteprojecto e os primeiros sistemas desenvolvidos encontravam-se orientados para a avaliação do impacto ambiental de materiais e produtos, não só da indústria da construção, como também de outras indústrias. Actualmente, os sistemas LCA incluem o desempenho económico na avaliação. A avaliação do desempenho económico é um factor importante no sucesso comercial de qualquer edifício. Devido ao facto de avaliarem os impactos ambientais directa e indirectamente associados à totalidade do ciclo de vida dos materiais e produtos, estes sistemas fornecem dados importantes para a avaliação da sustentabilidade (fig. 2). Exemplos deste tipo de sistemas são: Eco-Quantum (Holanda), Eco-Effect (Suécia), ENVEST (Reino Unido), BEES (Estados Unidos), ATHENA (Canada) e LCA House (Finland).

Os sistemas e ferramentas de avaliação e reconhecimento da construção sustentável têm como objectivo garantir a sustentabilidade dos edifícios durante a totalidade do seu ciclo de vida (projecto, construção, operação, manutenção, demolição/desconstrução), promovendo e tornando possível uma melhor integração entre os parâmetros ambientais, sociais, funcionais, económicos e outros critérios convencionais. Existem métodos específicos para cada tipologia de edifício e para cada fase do ciclo de vida do mesmo.

Estes métodos e ferramentas podem ser utilizados no suporte à concepção de edifícios sustentáveis, pois eles traduzem a sustentabilidade em determinados objectivos por requisito na avaliação do desempenho global. Apesar de existirem diferentes abordagens em diferentes sistemas de avaliação e reconhecimento da construção sustentável existem, no entanto, certos pontos em comum nessas abordagens. Em geral, estes sistemas e ferramentas analisam de uma maneira ou de outra as mesmas categorias de projecto e de desempenho: local, água, energia e qualidade do ambiente interior.

A maior parte dos sistemas de avaliação e reconhecimento de edifícios sustentáveis são baseados nos regulamentos e legislação local, em soluções construtivas convencionais e o peso de cada parâmetro e indicador na avaliação é predefinido de acordo com as realidades sócio-cultural, ambiental e económica do local. Deste modo, a maior parte deles só pode ter reflexo às escalas local ou regional. No entanto, existem alguns exemplos de métodos que podem ser utilizados à escala global. Este tipo de métodos está sobretudo orientado para utilização nos meios académicos, pois as bases de dados com os requisitos de referência associados a determinado local e para um determinado tipo de utilização têm de ser desenvolvidas durante a avaliação, o que se traduz num processo moroso e oneroso.

Existem actualmente três diferentes tipos de sistemas de avaliação e reconhecimento de edifícios sustentáveis que constituem a base de outras abordagens utilizadas internacionalmente: Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM), desenvolvido no Reino Unido; Leadership in Energy and Environmental design (LEED), desenvolvido nos E.U.A.; Green Building Challenge Framework (GBTool), desenvolvido pelo trabalho de equipas pertencentes a 20 países.

Em sistemas como o BREEAM e o LEED a avaliação é baseada numa *checklist* de projecto que reúne uma série de pré-requisitos e pontuações associadas a determinadas metas de projecto e de desempenho. Uma das condições para se obter o reconhecimento é o cumprimento de todos os pré-requisitos. Quando o edifício cumpre ou excede o desempenho pretendido para cada parâmetro, um ou mais “pontos” podem ser obtidos. O somatório de todos os pontos determina o desempenho global do edifício.

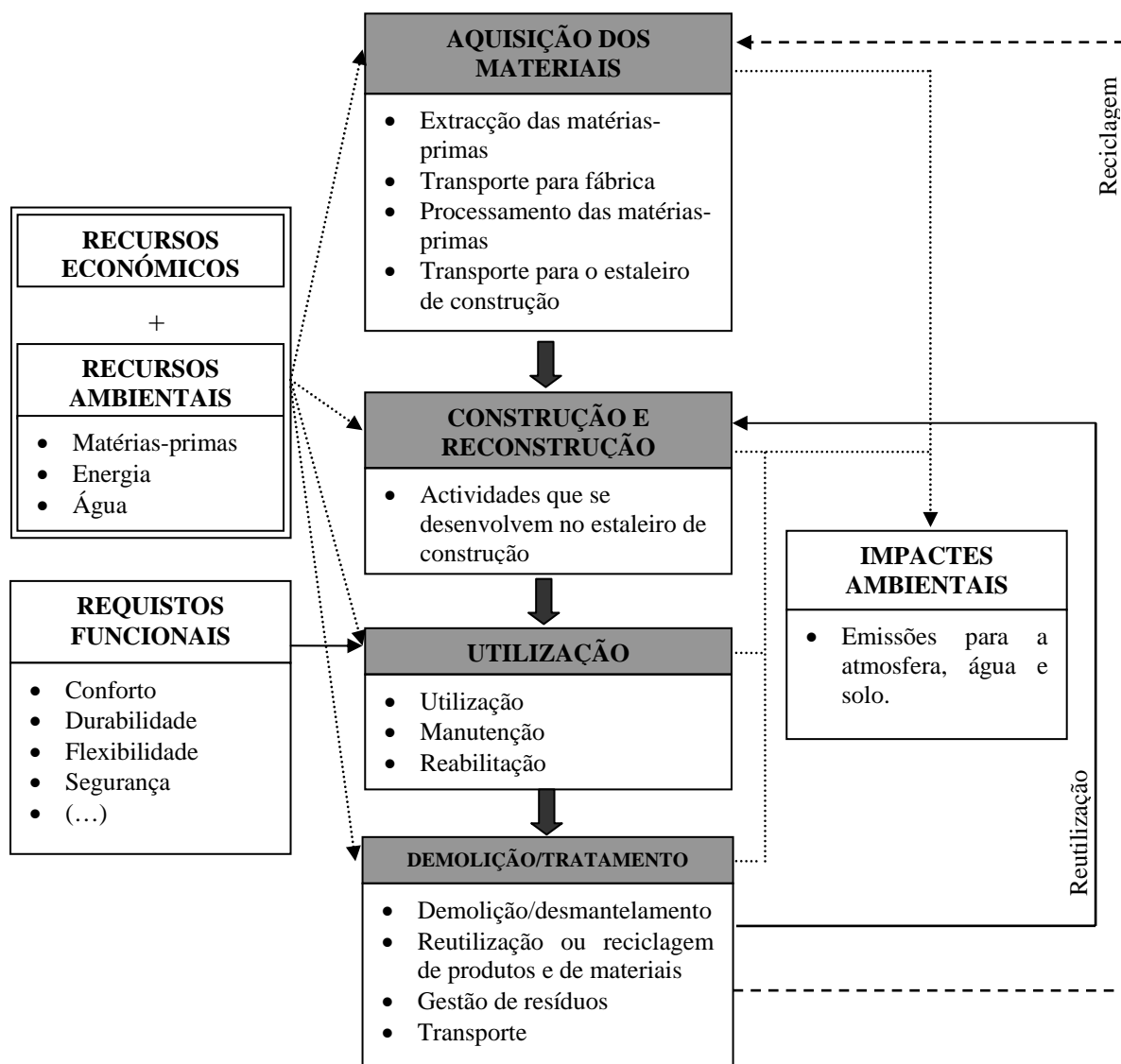


Figura 2 – Abordagem integrada ao ciclo de vida de um edifício

No GBTool a avaliação é realizada através da comparação do desempenho de um edifício ao nível de cada parâmetro com casos de referência. Neste sistema, os casos de referência para cada parâmetro têm de ser criados para cada tipo de edifício, o que consome muitos recursos. O peso de cada parâmetro e indicador na avaliação do desempenho global pode ser ajustado, em função das prioridades locais. Esta ferramenta integra um sistema muito básico para a contabilização dos impactes ambientais incorporados nos materiais de construção. No entanto, pode-se utilizar uma ferramenta LCA externa para quantificar esses impactes. No quadro 1 encontram-se resumidas as diferenças entre as áreas de verificação consideradas nos sistemas mais conhecidos de avaliação e reconhecimento da sustentabilidade de edifícios de habitação.

Quadro 1 – Principais áreas de verificação nos sistemas mais conhecidos de avaliação e reconhecimento da sustentabilidade de edifícios de habitação

	Sistemas de avaliação		
	LEED-H ¹	BREEAM ²	GBTTool ³
Principais áreas de verificação	1. Energia e atmosfera 2. Materiais e outros recursos 3. Utilização sustentável do solo 4. Qualidade do ar interior 5. Utilização eficiente de água 6. Localização 7. Inovação e desenho 8. Formação dos utilizadores	1. Energia 2. Saúde e bem-estar 3. Utilização do solo e ecologia 4. Impacte dos materiais 5. Poluição da água e do ar 6. Utilização eficiente da água 7. Transporte	1. Selecção do local; 2. Consumo de energia e materiais 3. Impactes ambientais 4. Qualidade do ar interior 5. Qualidade do serviço 6. Desempenho a longo prazo 7. Gestão de operações 8. Aspectos sociais e económicos

3. Avaliação da sustentabilidade de soluções construtivas: metodologia MARS-SC

Como já se referiu anteriormente, a sustentabilidade é uma questão relativa, que deve ser avaliada comparativa e relativamente à prática corrente – a solução de referência – num determinado país ou local. Deste modo, é possível verificar se, ao nível de cada parâmetro analisado, a solução em estudo é melhor ou pior do que a solução de referência. O patamar mínimo de sustentabilidade deve corresponder, numa primeira fase, à solução com mais expressão no mercado, devendo ser ajustado ao longo do tempo em função do desenvolvimento tecnológico. A solução mais sustentável depende daquilo que o limite tecnológico pode proporcionar em cada momento.

Na Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC) a sustentabilidade das soluções construtivas é avaliada, para cada elemento construtivo, relativamente à solução construtiva mais aplicada num determinado local – solução de referência. Nesta metodologia são considerados três dimensões: ambiental, funcional e económica. As fases para a aplicação desta metodologia resumem-se nas secções seguintes.

¹ Na versão 1.72 do LEED para habitação (LEED-H).

² Na versão 1.1 do BREEAM para habitação (ECOHOMES).

³ Na versão de Março de 2005.

3.1. Definição dos parâmetros

A avaliação da sustentabilidade é realizada, tal como se referiu anteriormente, de uma forma holística, pois é de todo impossível considerar na avaliação todos os parâmetros que exprimem o comportamento de uma solução ao nível das três dimensões do desenvolvimento sustentável. Assim, nesta fase estabelece-se o número e tipo de parâmetros a analisar em cada uma das dimensões. A definição dos parâmetros depende dos objectivos da avaliação, das características próprias das soluções construtivas, das exigências funcionais que se pretendam satisfeitas, das características particulares do local e dos dados disponíveis. Em cada dimensão podem ser avaliados, entre outros, os parâmetros apresentados no quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros ambientais, funcionais e económicos potencialmente aplicáveis à metodologia MARS-SC

Parâmetros		
Ambiental	Funcional	Económica
Potencial de aquecimento global (PAG);	Isolamento sonoro a sons de condução aérea;	Custo de construção;
Energia primária incorporada (PEC);	Isolamento sonoro a sons de percussão;	Custo de manutenção;
Conteúdo reciclado;	Isolamento térmico;	Custo de reabilitação;
Potencial de reciclagem;	Durabilidade;	Custo de desmantelamento/ demolição;
Potencial de reutilização;	Comportamento ao fogo;	Valor residual;
Quantidade de matéria/recursos naturais utilizados;	Impermeabilidade;	Custo do tratamento para devolução ao ambiente natural.
Toxicidade;	Estabilidade;	
Acidificação;	Comportamento sísmico;	
Eutrofização das reservas de água;	Construtibilidade;	
Quantidade de água incorporada.	Flexibilidade;	
	Inovação e desenho.	

3.2. Quantificação dos parâmetros

Depois de seleccionar os parâmetros a considerar na avaliação é necessário proceder à quantificação de cada parâmetro. A quantificação é indispensável para a comparação das soluções, agregação dos parâmetros e avaliação precisa da solução. O método de quantificação deve ser previamente definido, podendo ser utilizados diferentes tipos de métodos: resultados de estudos realizados anteriormente

(bases de dados), ferramentas de simulação, opinião de especialistas e processamento de bases de dados (Cherqui *et al*, 2004).

3.3. Normalização dos parâmetros

A normalização dos parâmetros tem por objectivos evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros de cada indicador e resolver o problema de alguns dos indicadores serem do tipo “quanto maior melhor” e outros do tipo “quanto maior pior”. Na normalização é utilizada a fórmula de Diaz-Balteiro (2004):

$$\overline{P_i} = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}} \forall i \quad [1]$$

Nesta equação, P_i representa o resultado da quantificação do parâmetro i . P_i^* e P_{*i} são respectivamente o melhor e o pior resultado do parâmetro de sustentabilidade i .

A normalização dos parâmetros considerados na avaliação da sustentabilidade torna-os adimensionais e converte-os numa escala limitada entre 0 (pior valor) e 1 (melhor valor). Esta fórmula é assim válida quando o parâmetro é do tipo “quanto maior melhor” e quando é do tipo “quanto maior pior”.

3.4. Agregação dos parâmetros

A avaliação da sustentabilidade de soluções construtivas contempla diversos campos, o que envolve a utilização de numerosos parâmetros. A apresentação do desempenho de uma solução através da listagem dos resultados obtidos ao nível de todos os parâmetros considerados dificulta a compreensão do desempenho global da solução. A melhor forma de contornar esta situação passa por combinar, dentro de cada indicador, os diversos parâmetros em função da importância (peso) que cada um assume no cumprimento dos requisitos do projecto. Desta forma, obtém-se um valor resumo que representa o desempenho relativo da solução ao nível de cada indicador.

O desempenho parcial da solução ao nível de cada indicador (I_j) é calculado de acordo com o método de agregação apresentado na equação 2.

$$I_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \overline{P_i} \quad [2]$$

Nesta equação, I_j é a média ponderada de todos os parâmetros normalizados $\overline{P_i}$ pertencentes ao indicador j e w_i representa o peso relativo do parâmetro i . A soma de todos os pesos deve ser igual a 1.

As equações 3 a 6 apresentam o modo como se agregam os parâmetros dentro de cada indicador para se determinar o desempenho da solução ao nível de cada dimensão do desenvolvimento sustentável.

$$\text{Desempenho ambiental:} \quad I_A = \sum_{i=1}^n w_{Ai} \cdot \overline{P_{Ai}} \quad [3]$$

$$\text{Desempenho funcional:} \quad I_F = \sum_{i=1}^n w_{Fi} \cdot \overline{P_{Fi}} \quad [4]$$

Com,

$$\sum_{i=1}^m wA_i = \sum_{i=1}^n wF_i = 1 \quad [5]$$

Na quantificação do desempenho económico, como se considera apenas um valor que resulta do somatório de todos os custos de ciclo de vida que é possível obter, o desempenho económico de cada solução assume o mesmo valor do parâmetro económico normalizado, tal como se apresenta na equação 6.

$$\text{Desempenho económico: } I_E = \overline{P_E} \quad [6]$$

O peso de cada parâmetro na avaliação do desempenho da solução ao nível de cada indicador não é consensual e varia de metodologia para metodologia de avaliação e reconhecimento da construção sustentável.

Ao nível dos parâmetros ambientais já existem alguns estudos que permitem a definição quase consensual dos pesos. Desses estudos, destacam-se os realizados pela United States Environmental Protection Agency (EPA), nos quais foi analisado, para uma lista de doze parâmetros ambientais, a importância de cada um relativamente aos restantes, em função dos efeitos nocivos para o ambiente. Os resultados desse estudo encontram-se apresentados no quadro 3. Quando não existem estudos locais ou regionais que sustentem a definição mais rigorosa dos pesos, sugere-se que na aplicação da MARS-SC se utilizem directamente ou por extrapolação os pesos apresentados nesse estudo.

Quadro 3 – Peso de cada parâmetro na avaliação do desempenho ambiental (EPA *et al*, 1990 e 2000)

Parâmetro	Peso (%)
Aquecimento global	24
Acidificação	8
Eutrofização	8
Utilização de combustíveis fósseis	8
Qualidade do ar interior	16
Alteração dos habitats	24
Utilização de água	4
Emissão de gases poluentes	8
Criação de “Smog”	6
Toxicidade para os ecossistemas	11
Toxicidade para o ser humano	11
Destruição da camada de ozono	5

Apesar da quantificação dos parâmetros funcionais ser relativamente simples, o modo como cada parâmetro influencia o desempenho funcional e consequentemente a sustentabilidade não é consensual. Esta avaliação envolve a atribuição subjectiva de pesos e depende fundamentalmente do tipo de utilização da solução, assim como das características socio-económicas e culturais do avaliador. Assim, numa primeira fase pode-se admitir que todos os parâmetros funcionais apresentam o mesmo peso na avaliação do desempenho funcional. De modo a obter valores mais consensuais poder-se-ão realizar inquéritos direccionados aos potenciais utilizadores, de forma a identificar quais os parâmetros que são considerados mais importantes. Através da aplicação de uma metodologia de

análise multi-critério como, por exemplo, a metodologia AHP (Analytic Hierarchy Process) é possível quantificar o peso de cada parâmetro (Saaty, 1990).

3.5. Determinação da nota sustentável

Depois de avaliado o desempenho da solução ao nível de cada indicador (ambiental, funcional e económico) a fase seguinte consiste em se sintetizar num único valor (nota sustentável) o desempenho da global da solução construtiva. A nota sustentável é calculada através da equação 7.

$$NS = w_{G1} \cdot I_A + w_{G2} \cdot I_F + w_{G3} \cdot I_E \quad [7]$$

Nesta fórmula, a NS (nota sustentável) é o resultado da ponderação de cada indicador I_j com o respectivo peso (w_j) na avaliação sustentabilidade. De modo a se obter uma nota sustentável entre 0 e 1, a soma dos pesos atribuídos aos três indicadores tem de ser igual a 1.

O modo como o desempenho ao nível de cada indicador influencia a sustentabilidade global não é consensual. Numa primeira abordagem pode-se considerar uma distribuição equitativa dos pesos por cada indicador. No entanto, considerando que com a implementação do conceito “construção sustentável” se pretende principalmente uma maior compatibilidade entre os ambientes construído e natural, sem que se comprometa o desempenho funcional do produto e de forma a que este apresente uma adequada relação custo/benefício, na aplicação da metodologia MARS-SC adopta-se por defeito a distribuição de pesos apresentada no quadro 4. No entanto, pode-se ajustar o peso de cada um dos parâmetros de acordo com os objectivos pretendidos para o projecto.

Quadro 4 – Peso de cada indicador na aplicação da metodologia MARS-SC

Indicador (I_j)	Peso (w_i)
Ambiental	0,40
Funcional	0,40
Económico	0,20

Comparando o valor da nota sustentável (NS) obtida com o valor da nota sustentável da solução de referência (NS_{ref}), classifica-se qualitativamente a sustentabilidade relativa das soluções construtivas em avaliação, de acordo com o apresentado no quadro 5.

Quadro 5 – Avaliação do desempenho relativo da solução em estudo a partir da NS

Nota sustentável (NS)	Classificação do desempenho
$< NS_{ref}$	Inferior
$= NS_{ref}$	Referência
$> NS_{ref}$	Superior

O valor NS não deve ser utilizado individualmente para caracterizar a sustentabilidade de uma solução. Nos resultados finais devem também ser apresentados os desempenhos parciais da solução,

ao nível dos três indicadores, de modo a se evitar a incorrecta interpretação de resultados causada pela possível compensação entre indicadores, pois soluções com comportamento bastante distinto ao nível de cada indicador podem apresentar a mesma nota sustentável.

3.6. Perfil sustentável

A última fase da aplicação da metodologia consiste em representar graficamente o valor normalizado dos parâmetros analisados (perfil sustentável). Deste modo, é possível observar de uma forma clara as diferenças que existem entre o desempenho de cada solução ao nível de cada parâmetro.

Na MARS-SC, a representação gráfica faz-se através dum gráfico tipo radar, também conhecido por diagrama de Amoeba, que apresenta um número de raios igual ao número de parâmetros em análise. Neste gráfico, quanto mais perto do centro se encontra representada uma solução, menor será a sua sustentabilidade.

Para que facilmente se observem as diferenças entre cada solução e a solução de referência, o perfil sustentável da solução de referência (representado pela linha) é traçado sobre o perfil de cada solução (representado a cheio), tal com se pode observar nas figuras 3 e 4. A título de exemplo, se o perfil sustentável de uma solução for semelhante ao representado na figura 3, o desempenho da solução em estudo é melhor do que a de referência ao nível de todos os parâmetros. Caso contrário a solução de referência é mais sustentável (fig. 4).

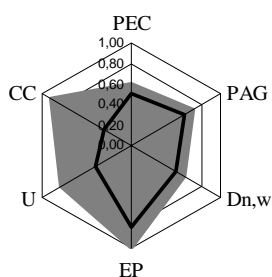


Figura 3 – Perfil sustentável (exemplo em que a solução em estudo é mais sustentável do que a solução de referência)

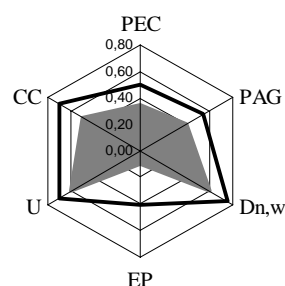


Figura 4 – Perfil sustentável (exemplo em que a solução em estudo é menos sustentável do que a solução de referência)

4. Estudo de caso: aplicação da MARS-SC

4.1. Definição dos parâmetros e respectivo peso

Nesta secção apresenta-se um estudo de caso relativo à aplicação da MARS-SC a algumas soluções construtivas para paredes exteriores e pavimentos. Neste estudo pretende-se encontrar as soluções construtivas que correspondam ao melhor compromisso entre dois parâmetros ambientais, três funcionais e um económico, através da utilização da MARS-SC.

Os Quadros 6 e 7 representam, respectivamente, os parâmetros considerados na avaliação das soluções construtivas para paredes e pavimentos. Nos quadros encontram-se também os pesos atribuídos a cada

um dos parâmetros na avaliação do desempenho das soluções dentro de cada dimensão do desenvolvimento sustentável e na determinação da nota sustentável global.

Quadro 6 – Parâmetros e pesos considerados na avaliação das soluções construtivas para paredes

Indicador	Parâmetro	Peso do parâmetro	Peso do indicador
Ambiente	Energia primária incorporada (PEC)	0,75	0,30
	Potencial de aquecimento global (PAG)	0,25	
Funcionalidade	Isolamento a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)	0,33	0,50
	Espessura da parede (EP)	0,33	
	Isolamento térmico (U_{med})	0,33	
Economia	Custo de construção (CC)	1,00	0,20

Quadro 7 – Peso dos parâmetros e indicadores na avaliação da sustentabilidade

Indicador	Parâmetro	Peso do parâmetro	Peso do indicador
Ambiente	Energia primária incorporada (PEC)	0,75	0,30
	Potencial de aquecimento global (PAG)	0,25	
Funcionalidade	Isolamento a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)	0,33	0,50
	Isolamento a sons de percussão ($L'_{n,w}$)	0,33	
	Isolamento térmico (U_{med})	0,33	
Economia	Custo de construção (CC)	1,00	0,20

4.2. Apresentação das soluções construtivas analisadas

Nas figuras 5 a 8 representam-se os perfis construtivos das soluções construtivas para paredes que foram analisadas. Devido à elevada expressão da parede dupla em alvenaria de tijolo vazado no Norte de Portugal, considerou-se esta tecnologia construtiva com sendo a de referência. Atendendo à importância do isolamento térmico, comparativamente a outras exigências funcionais das paredes exteriores, o perfil das soluções construtivas foi definido de modo a que todas as paredes apresentassem, pelo menos, o mesmo isolamento térmico da solução de referência. No entanto, tal como se pode verificar nos resultados obtidos, as paredes não apresentam o mesmo coeficiente global de transferência de calor. Esta situação deve-se ao facto de se terem considerado as dimensões padrão para cada material utilizado.

Os perfis construtivos das soluções construtivas para pavimentos analisadas neste estudo encontram-se apresentadas nas figuras 9 a 12. A este nível, a solução construtiva mais utilizada no Norte de Portugal é o pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas. Desta forma considerou-se essa solução como solução de referência. Como uma das exigências funcionais mais importante nos pavimentos é a resistência estrutural, todos os pavimentos foram dimensionados de modo a que se verificassem os estados limites últimos e de utilização, quando submetidos às mesmas acções.

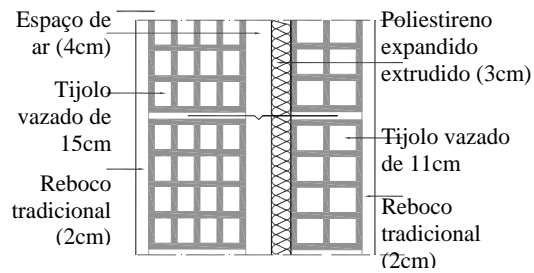


Figura 5 – Solução construtiva de referência Par 1

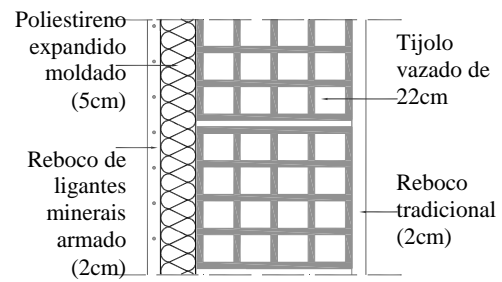


Figura 6 – Solução construtiva Par 2

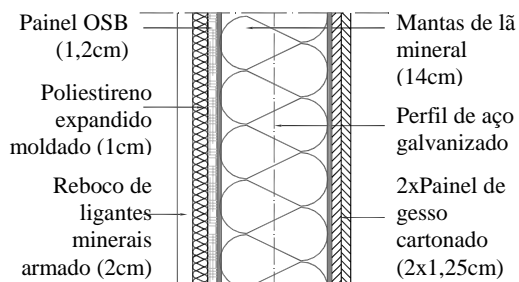


Figura 7 – Solução construtiva Par 3

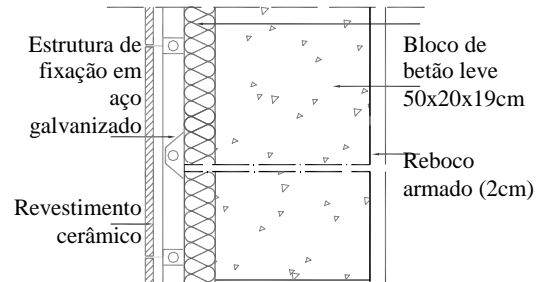


Figura 8 – Solução construtiva Par 4

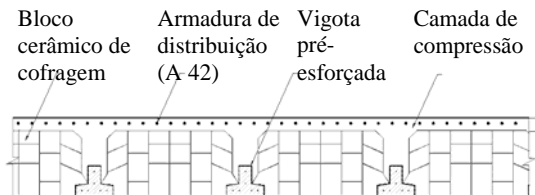


Figura 9 – Solução construtiva de referência Par 1

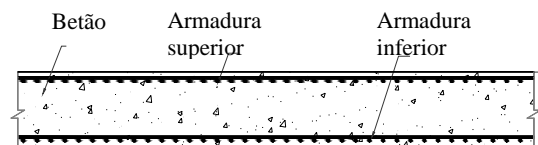


Figura 10 – Solução construtiva Par 2

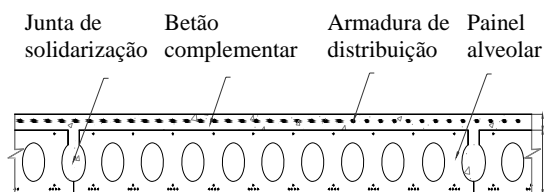


Figura 11 – Solução construtiva Par 3

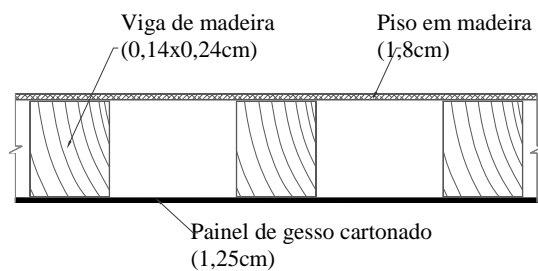


Figura 12 – Solução construtiva Par 4

4.3. Resultados obtidos

Nos quadros 8 e 9 apresentam-se, respectivamente para as paredes e pavimentos, os resultados obtidos na quantificação dos parâmetros considerados na avaliação. Para facilitar a comparação entre soluções construtivas, os resultados encontram-se apresentados por unidade de superfície.

Quadro 8 – Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros para as paredes

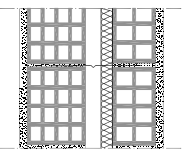
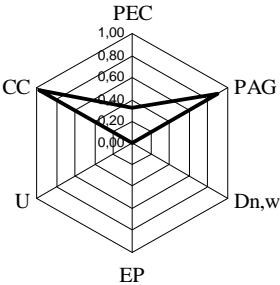
Solução construtiva	PAG ¹ (kgeqCO ₂ /m ²)	PEC ¹ (kWh/m ²)	D _{n,w} ² (dB)	U ³ (W/m ² .°C)	EP (m)	CC ⁴ (€/m ²)
Par1	48,78	289,79	48	0,58	0,37	46,68
Par2	40,58	115,03	49	0,52	0,31	43,28
Par3	97,87	302,44	51	0,25	0,23	133,40
Par4	109,18	372,51	49	0,54	0,31	135,80

Quadro 9 – Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros para os pavimentos

Solução construtiva	PAG ¹ (kgeqCO ₂ /m ²)	PEC ¹ (kWh/m ²)	D _{n,w} ² (dB)	L' _{n,w} ⁵ (dB)	U _{med} ³ (W/m ² .°C)	CC ⁴ (€/m ²)
Pav1	185,07	63,66	55	75	2,20	35,45
Pav2	239,39	72,45	54	79	3,51	47,89
Pav3	169,68	47,84	54	76	2,80	120,50
Pav4	32,33	5,31	38	83	1,90	140,00

Nos quadros 10 e 11, respectivamente, encontram-se resumidos os resultados obtidos na aplicação da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC) às soluções construtivas para paredes exteriores e pavimentos.

Quadro 10 – Resultados obtidos na aplicação da MARS-SC a algumas soluções construtivas para paredes

Solução Construtiva	Perfil sustentável	Desempenho			Nota Sustent. (NS)	Class. do desemp.
		Amb. (I _A)	Func. (I _F)	Econ. (I _E)		
Par1 (referência) 		0,46	0,00	0,96	0,33	Referência

¹ Calculado a partir dos valores LCI apresentados por Berge (2000) para a Europa Central.

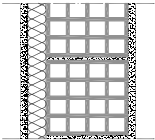
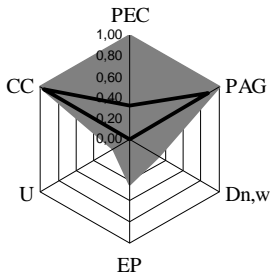
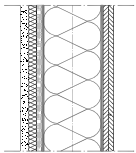
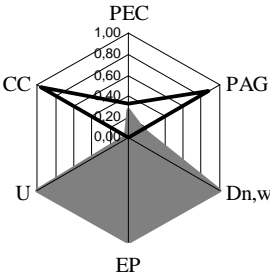
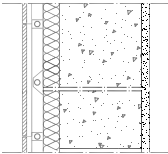
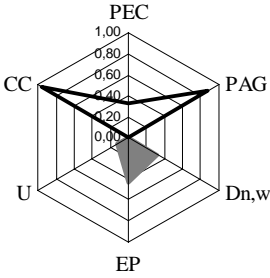
² Calculado segundo a Norma Portuguesa NP-2073.

³ Calculado de acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (R.C.C.T.E. – DL 40/90 de 6 de Fevereiro).

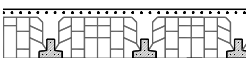
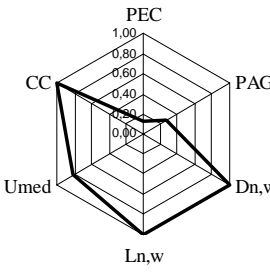
⁴ O custo de construção resulta da média dos preços unitários obtidos a partir de uma sondagem realizada a algumas empresas que laboram no distrito de Braga.

⁵ Calculado através do método do invariante $D_{n,w} + L'_{n,w}$.


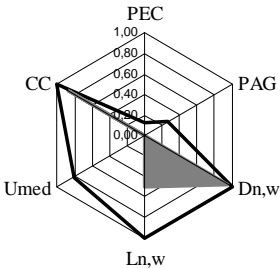
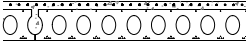
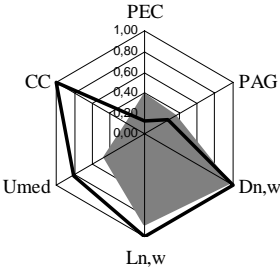

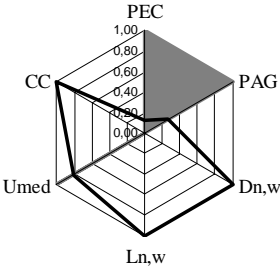
Quadro 10 (cont.) – Resultados obtidos na aplicação da MARS-SC a algumas soluções construtivas para paredes

Solução Construtiva	Perfil sustentável	Desempenho			Nota Sustent. (NS)	Class. do desemp.
		Amb. (I _A)	Func. (I _F)	Econ. (I _E)		
Par2 		1,00	0,31	1,00	0,66	Superior
Par3 		0,25	0,99	0,03	0,57	Superior
Par4 		0,00	0,29	0,00	0,15	Inferior

Quadro 11 – Resultados obtidos na aplicação da MARS-SC a algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução Construtiva	Perfil sustentável	Desempenho			Nota Sustent. (NS)	Class. do desemp.
		Amb. (I _A)	Func. (I _F)	Econ. (I _E)		
Pav1 (referência) 		0,16	0,93	1,00	0,71	Referência

Quadro 11 (cont.) – Resultados obtidos na aplicação da MARS-SC a algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução Construtiva	Perfil sustentável	Desempenho			Nota Sustent. (NS)	Class. do desemp.
		Amb. (I _A)	Func. (I _F)	Econ. (I _E)		
Pav2 		0,00	0,48	0,88	0,41	Inferior
Pav3 		0,36	0,74	0,19	0,52	Inferior
Pav4 		1,00	0,33	0,00	0,47	Inferior

4.4. Discussão dos resultados

Em primeiro lugar, é de salientar que os resultados obtidos dependem dos parâmetros considerados na avaliação e no seu respectivo peso. Se nesta avaliação fossem utilizados outros parâmetros os resultados poderiam ser diferentes.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC às soluções construtivas para paredes exteriores, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução construtiva mais sustentável é a Par2 – parede simples com reboco armado sobre isolante contínuo pelo exterior. Esta parede apresenta, em relação a todos os parâmetros analisados, melhor comportamento do que a solução de referência e dentro da amostra analisada é a mais equilibrada em termos de comportamento nos parâmetros analisado. A utilização mais racional de materiais é determinante para que esta tecnologia obtenha este resultado. É de salientar que a grande vantagem funcional desta tecnologia reside no facto do isolamento térmico ser contínuo e pelo exterior. Esta situação permite não só a correcção das pontes térmicas, mas também a disponibilização da totalidade da massa da parede para a inércia térmica interior. Se se tivesse considerado estes parâmetros, as melhorias em relação à solução convencional seriam mais notadas. Devido à utilização mais racional de materiais, superior isolamento térmico e menor investimento inicial, esta solução

construtiva corresponderá a uma evolução expectável para a envolvente vertical exterior dos edifícios. A solução construtiva analisada menos sustentável é a Par4 – parede ventilada com elemento de suporte em alvenaria de blocos de betão leve e revestimento exterior descontínuo em material cerâmico fixado em estrutura metálica. A solução construtiva Par4, revelou-se a menos sustentável, fundamentalmente devido à elevada energia incorporada e elevado potencial de aquecimento global. O mau desempenho ambiental está sobretudo associado à quantidade utilizada de aço. No entanto, é preciso não esquecer que o aço utilizado pode ser 100% reciclado e que a estrutura de fixação pode ser reutilizada, o que numa análise que contemple o fim do ciclo de vida da solução construtiva pode resultar num comportamento mais positivo para esta solução.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC às soluções construtivas para pavimentos, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução construtiva mais sustentável é a Pav1 – pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem. A solução mais sustentável corresponde nesta amostra à solução de referência, pois é a solução mais equilibrada ao nível dos parâmetros analisados. Esta solução apresenta comparativamente às restantes soluções melhor comportamento funcional e económico. Ao nível do comportamento ambiental, esta solução só é ultrapassada pelo pavimento em estrutura de madeira. O pavimento menos sustentável é o pavimento em betão armado (Pav2). A menor sustentabilidade deve-se fundamentalmente ao facto desta solução apresentar o pior desempenho ambiental dentro das soluções analisadas. Esta realidade deve-se principalmente à incorporação de maior quantidade de aço, que é um material com elevada quantidade de energia incorporada (PEC) e elevado potencial de aquecimento global (PAG).

5. Conclusões

A concepção, construção, utilização e reabilitação sustentável de edifícios baseiam-se na avaliação da pressão ambiental e de aspectos funcionais (relacionados com as normas e regulamentos de construção e com as características psico-sociais dos utilizadores) e na análise dos custos associados ao seu ciclo de vida. A construção sustentável procura uma maior compatibilidade entre os ambientes artificial e natural sem contudo comprometer os requisitos funcionais dos edifícios e dos seus elementos, assim como a viabilidade económica do produto.

Neste documento foram apresentadas diferentes abordagens à avaliação da sustentabilidade da construção, nomeadamente no sector dos edifícios e uma metodologia para avaliação de soluções construtivas que servirá de base ao desenvolvimento de uma metodologia nacional para avaliar a sustentabilidade à escala dos edifícios. Apesar de já existirem alguns estudos acerca dos indicadores e parâmetros que servem de suporte à avaliação sustentável, subsiste ainda a necessidade de se desenvolver uma metodologia consensual para a avaliação dos edifícios, quer a nível nacional como internacional. Estas metodologias serão úteis no apoio aos donos-de-obra, utilizadores, engenheiros e arquitectos durante as diversas fases do ciclo de vida dos edifícios, de modo a que o desempenho do edifício seja em todas essas fases compatível com o desenvolvimento sustentável.

Apesar de não existir uma ferramenta de avaliação da sustentabilidade que seja aceite internacionalmente e apesar das actuais limitações associadas às diferentes metodologias, o desenvolvimento e discussão que tem ocorrido neste domínio está a ter relevantes impactes directos e indirectos na concepção dos edifícios, como por exemplo:

- Estas metodologias estão a promover o debate na área da construção sustentável e a fomentar

outros benefícios indirectos tais como um maior diálogo e trabalho de equipa entre os projectistas e os restantes intervenientes na indústria da construção.

- Ao lidarem de uma forma holística com o conceito “edifício sustentável”, as metodologias fornecem indicações aos seus utilizadores acerca dos parâmetros e respectivo nível de desempenho que é preciso salvaguardar para que os edifícios sejam sustentáveis.
- As metodologias têm motivado a inovação, encorajando o desenvolvimento de novos materiais, produtos, serviços e práticas mais sustentáveis, e têm permitido que estas tecnologias apresentem um custo cada vez menor, à medida que vão sendo produzidas em maior escala.
- Ao sumariarem o desempenho de um edifício podem ser utilizados para reportar as suas características aos donos-de-obra ou aos futuros utilizadores, para que eles percebam o real valor do seu investimento.

As metodologias a desenvolver no futuro deverão ser suficientemente flexíveis para serem adaptadas aos objectivos de cada avaliação e ao mesmo tempo mais simples de modo a que tenham potencialidade para serem utilizadas fora do meio académico. Para que as metodologias de avaliação da sustentabilidade sejam realmente utilizadas, será ainda mais importante desenvolver metodologias mais objectivas do que as actuais e fáceis de entender por todos os intervenientes no mercado da construção, de modo a que no futuro a indústria da construção seja mais compatível com os desígnios do desenvolvimento sustentável.

6. Bibliografia

Berge, Bjorn (2000). Ecology of Building Materials. Architectural Press, England.

DGE (2000). Balanço Energético Nacional de 2000. Direcção Geral da Energia.

Erlandsson M. & Borg M. (2003). Generic LCA-methodology for buildings, constructions and operation services – today practice and development needs. Building and Environment 38(2003)p. 919-938.

Edwards, S. & Bennett, P. (2003). Construction products and life-cycle thinking. UNEP Industry and Environment, Apr.-Sep., p. 57-61.

Mateus, R. (2004). Novas Tecnologias Construtivas Com Vista à Sustentabilidade da Construção. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Roodman, D. M.; Lenssen N. (1995). A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns are Transforming Construction. Worldwatch Paper 124, Worldwatch Institute, Washington, DC, March.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. Journal of Operational Research, Vol. 48, No. 1, pp. 9-26.

United States Environmental Agency (EPA); Science Advisory Board (SAB). (1990). Toward Integrated Environmental Decision Making. EPA-SAB-EC-00-011, Washington, D.C., August 2000 and United States Environmental Agency; Science Advisory Board (SAB). Reducing Risk: Setting Priorities and Strategies for Environmental Protection. SAB-EC-90-021, Washington, D.C., pp 13-14.